

水蒸気噴火の噴火史研究

Reconstruction of Eruptive History of Phreatic Eruptions

奥野 充

Mitsuru OKUNO

Abstract

Phreatic eruptions characterized by no juvenile magmatic material have occurred frequently at Quaternary volcanoes as well as geothermal areas in the Japanese Arc. Eruptive history of phreatic eruptions provides fundamental data for prevention and/or reduction of volcanic hazard. The tephra by phreatic eruptions should be identified by careful observation of occurrence in the field. The formula by Hayakawa (1985) can be applicable to volume estimation of the tephra, using the most reliable contour line. The ^{14}C dates of paleosol underlying tephra layers represent the eruption age.

Key words: eruptive history, phreatic eruption, volume and age estimations, volcanic hazard

1 はじめに

火山噴火 (volcanic eruption) とは、地球内部から比較的急速に地表へ物質が放出される現象をいう (荒牧 1975)。そのうち、水蒸気噴火 (phreatic eruption) は、新しいマグマに由来する本質物質を伴わない、類質・異質物質の噴出によって特徴づけられる (Barberi et al. 1992)。雲仙普賢岳の 1990-94 年噴火 (渡辺ほか 1992) や九重星生山の 1995-96 年噴火 (波多江ほか 1997) でも、主に類質物質からなるテフラ (以下、類質テフラという) が噴出したが、本質物質である可能性が高い、ハイドレーションを受けていない火山ガラスも検出されている¹⁾。しかし、過去に噴出したテフラは、堆積後にハイドレーションを受けるため、本質物質か否かの判断が困難なことが多い。この研究では、肉眼で容易に本質物質が見つからない場合を水蒸気噴火と呼ぶ。

奥野 (1995) は、那須茶臼岳、高原山、日光白根山に分布する類質テフラを記載すると共に、既に文献に記載されていた類質テフラをも含めて、水蒸気噴火の規模や頻度を議論した。このなかで、類質テフラの体積 V を、層厚 T ・面積 S 曲線を利用した Hayakawa (1985) の経験式 $V=12.2 TS$ を用いて算出し、それらが 10^5 ~ 10^8 m^3 の範囲にあることを示した。その後も、1995 年中ノ湯 (三宅・小坂 1998)、1995-96 年の九重山 (中田ほか 1996)、1996 年の北海道駒ヶ岳 (宇井ほか 1997a)、雌阿寒岳 (宝田ほか 1997)、1997 年の澄川温

泉 (伊藤ほか 1997c; 塚本 1997)、秋田焼山 (林ほか 1997)、1998 年の雌阿寒岳 (中川ほか 1999)、北海道駒ヶ岳 (宝田ほか 1999)、2000 年の北海道駒ヶ岳 (中川ほか 2001) など、多くの火山や地熱地域で水蒸気噴火がおこっており²⁾、水蒸気噴火の規模・頻度の解明は、火山学的に意義深いだけでなく、噴火災害を防止・軽減するうえでもきわめて重要なものとなっている。このようなことから、火口周辺に分布する類質テフラを含む詳細な噴火史が、北八甲田山 (工藤ほか 1999、2000)、秋田焼山 (伊藤 1998)、西岩手山 (伊藤 1999)、鳴子 (伊藤ほか 1997a)、安達太良山 (山元 1997a, 1998)、那須茶臼岳 (山元 1997b)、磐梯山 (山元・須藤 1996)、焼岳 (及川ほか 2002)、九重山 (伊藤ほか 1997b)、鶴見岳 (藤沢ほか 2002)、阿蘇山 (宮縁・渡辺 2000) など、数多く報告されている。

水蒸気噴火などによる小規模テフラの体積計算について、宝田ほか (1997, 2001, 2002) は、雌阿寒岳の 1996 年噴火や有珠山の 2000 年噴火によるテフラを記載し、これらのテフラに対して Hayakawa (1985) の経験式を適用することに疑問を呈している。一方、水蒸気噴火の噴出年代は、テフラ直下の腐植土の ^{14}C 年代から明らかになっている。

本稿では、中部九州に位置する九重火山群の星生山周辺 (Fig. 1) におけるテフラ層序の予察的結果を示して、野外における類質テフラの認定方法について記述

する。類質テフラの体積計算法や年代決定法、水蒸気噴火の要因と災害についても議論する。

II 星生山周辺のテフラ層序の概略

Fig. 2 に星生山周辺に分布するテフラの柱状図を示す。この付近では、6.5 ka BP³⁾の鬼界アカホヤテフラ (K-Ah)、5.3 ka BPのA1火山灰 (Kj-A1) および4.3 ka BPの段原スコリア (Kj-DS) が分布している (Kamata and Kobayashi 1997)。これらの上位には、2枚の類質テフラが認められる。どちらも、伊藤ほか (1997b) により報告されているが、名称は与えられていなかった。本稿では、この研究によって明らかになった噴出地点を用いて、下位より久住分れテフラ (Kj-Wk)、硫黄山

テフラ (Kj-Iw) と新称する。

Kj-Wk は、黄白色の粘土質火山灰であり、その分布 (Fig. 3a) から久住分れ避難小屋付近から噴出したものと考えられる。伊藤ほか (1997b) は、このテフラ直下の腐植土を試料として、3.3~3.6 ka BPの¹⁴C年代を報告している。後述のように、このテフラの噴出にともなって、火山泥流または土石流が流下している (Fig. 3a)。

Kj-Iw は、白色の粘土質火山灰であり、その分布 (Fig. 3b) から硫黄山付近から噴出したものと考えられる。このテフラは、伊藤ほか (1997b) の約1.5 ka BPの火山灰層に相当する。

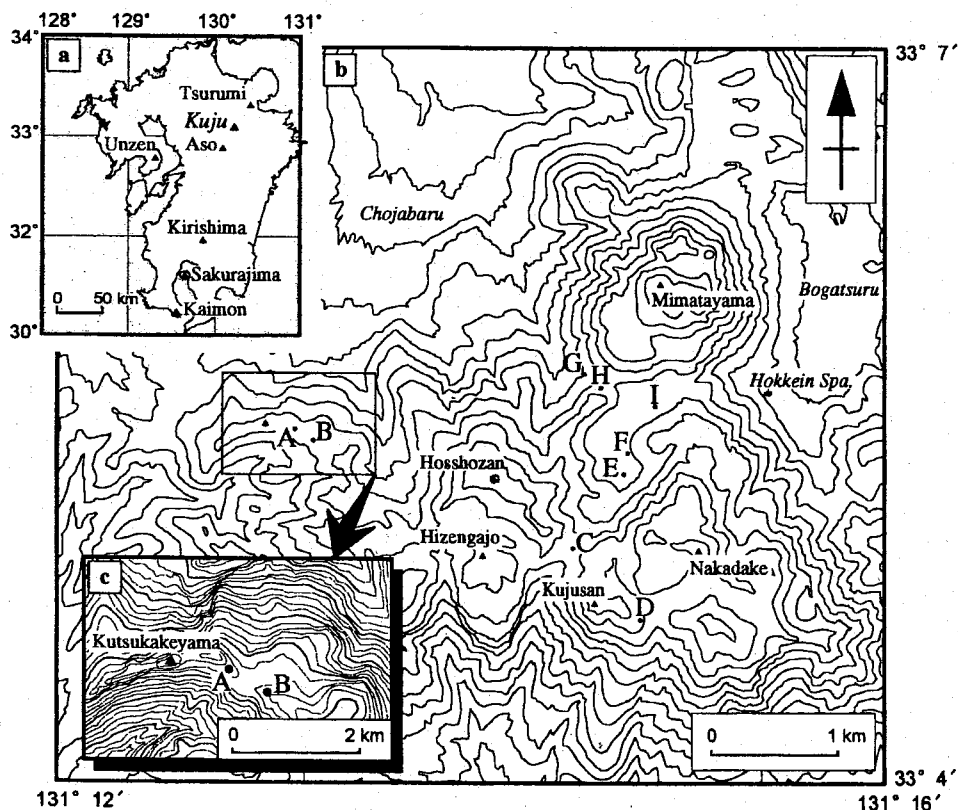


Fig. 1 Index and location maps. (a) Locality map of Kuju volcano. (b) Topographic map of the western part of Kuju volcano. Counter interval is 50 m. (c) Map showing geomorphology around Mt. Kutsukakeyama. Counter interval is 10 m.

III 野外での類質テフラの認定

野外における類質テフラの認定は、水蒸気噴火を含む詳細な噴火史研究の基礎である。以下では、その認定方法を露頭内、露頭間、分布傾向といった異なるスケールごとに記述する。

テフラの下限は、植物や土壌生物による攪乱を受けない限り明瞭である。この明瞭な境界は、火山噴火によって堆積物とその堆積速度が急激に変化したことを示す。

ただし、火山泥流や土石流堆積物でも明瞭な境界は認められる。降下テフラは、もとの地形にかかわらず、ほぼ一定の層厚で堆積する性質があり、火山泥流や土石流堆積物と識別可能である⁹⁾。三俣山南方の地点I (Fig. 1)のKj-Wkに対応する堆積物は、地形的低地を埋めるように堆積し、層厚も12~40 cmと著しく変化している。このことから、一部は土石流として堆積したものと考えられる。

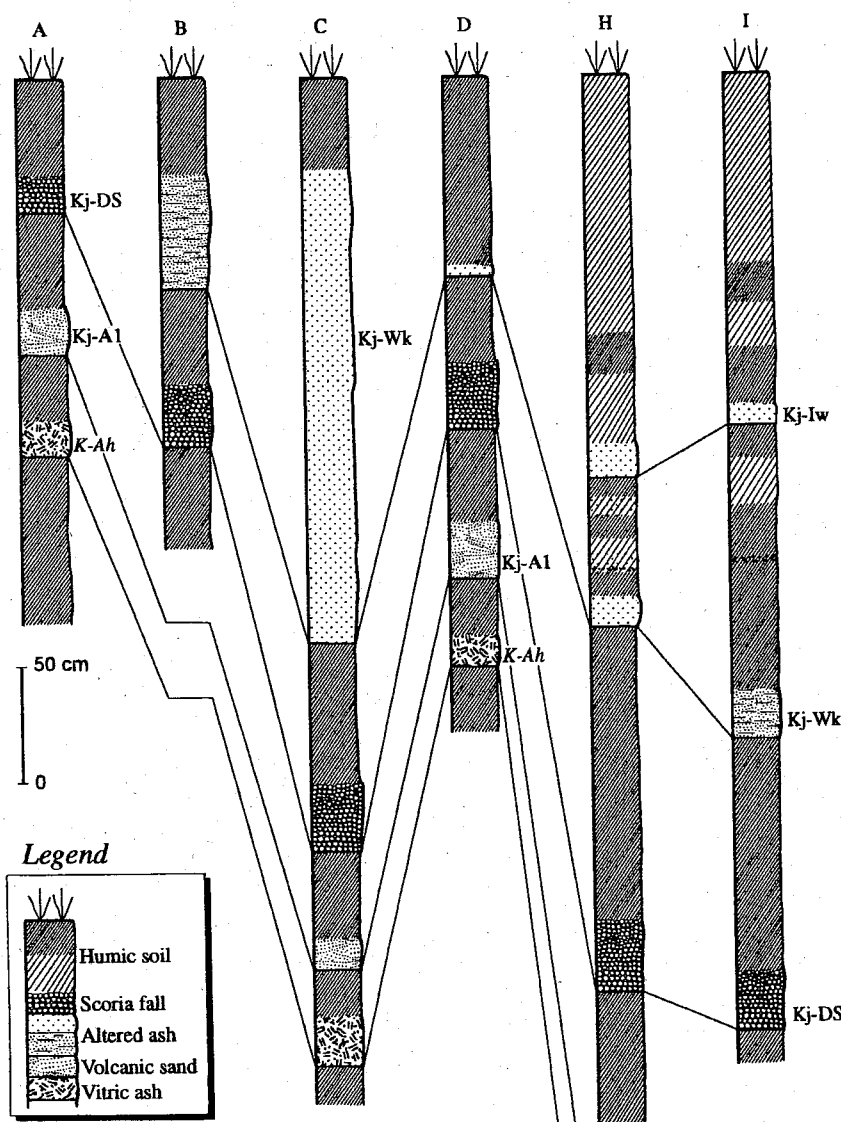


Fig. 2 Representative columnar sections of the middle to late Holocene tephra layers distributed on the western part of Kuju volcano. Localities of sections are shown in Fig.1.

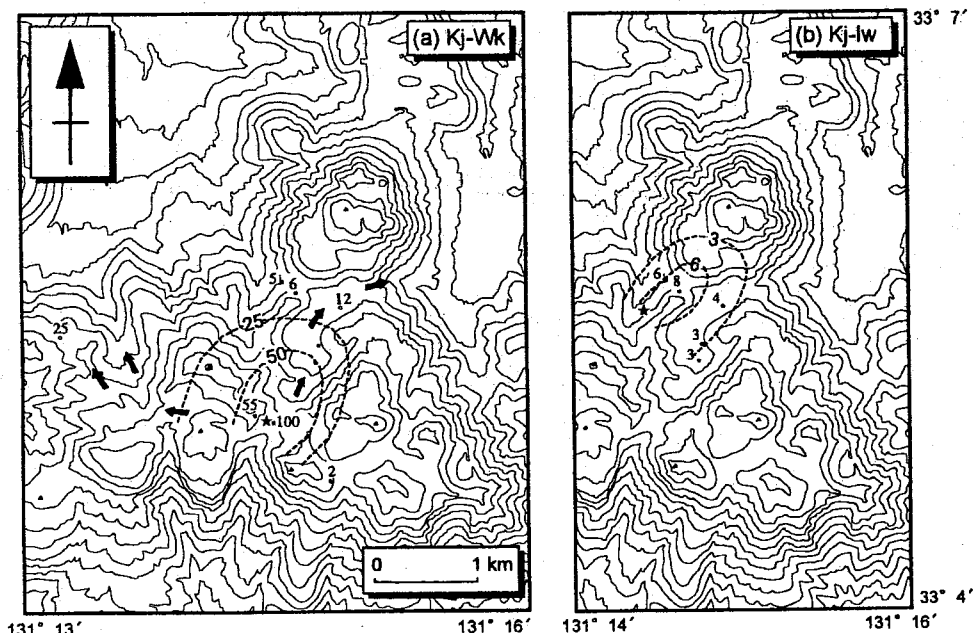


Fig. 3 Thickness maps of tephra layers by phreatic eruptions, in centimeters. Stars indicate inferred vents. (a) Isopach map of the Kujuwakare tephra (Kj-Wk). Open circles and arrows indicate thickness and directions of debris and/or mud flow deposits associated with the eruption, respectively. (b) Isopach map of the Iwoyama tephra (Kj-Iw).

1回の火山噴火は、地質学的にはローム層や腐植土が挟まない一連の噴火堆積物によって定義される(中村ほか 1963; Hayakawa 1985)。これは、ローム層や腐植土が、火山の休止期または静穏期に堆積したと考えられること(小林 1967)にもとづくものである。日本における完新世のローム層/腐植土の堆積速度は、およそ10 cm/kyと見積もられている(早川 1991, 1995)。しかし、火口周辺の斜面上では、テフラあるいは腐植土と考えられる堆積物を側方に追跡すると、露頭スケールで層厚が変化し、消滅することがある。また、露頭内で追跡できた場合でも、数メートル離れた露頭間で対比できないことがある。これはテフラや腐植土が再堆積して、1枚のテフラや腐植土が複数に分かれる、見かけ上の現象と考えられる。すなわち、この現象によって、噴火回数を重複して数えてしまう可能性がある。

降下テフラは、火口から離れるにしたがって、その層厚や粒径が系統的に減少する性質がある。1地点でしかみられなかったり、全体の分布傾向と調和的でない場合、既存または同時に堆積した泥流または土石流

堆積物である可能性がある。沓掛山東方の地点Aと地点B (Fig. 1c) ともに Kj-DS が分布しているが、Kj-Wk に対応する堆積物は鞍部を挟んだ東側の地点Bのみに分布する (Figs. 2 and 3a)。その層厚は25 ~ 60 cmと著しく変化し、全体の分布傾向とも調和していない (Fig. 3a)。この堆積物は、Kj-Wk にもなう土石流堆積物と考えられる。

星生山周辺において、伊藤ほか (1997b) は Kj-DS の上位に8枚の類質テフラを認めているが、上記の基準からテフラとして認定されたものは、現時点では Kj-Wk と Kj-Iw の2枚である。ただし、今後の調査によって、新たなテフラを追跡することができ、認定できるテフラの枚数が増える可能性がある。

IV 類質テフラの体積計算法

テフラの体積計算は、早川 (1990) も指摘しているように、分布限界まできちんと層厚が計測された等層厚線図が用意されれば、問題は何かもないと考えられる。しかし、過去におこった噴火について、このような等層厚線図を得ることは困難である。そのため、いくつ

かの計算方法が提案されている (例えば, Pyle 1989). Hayakawa (1985) は, Walker (1980) の結晶法の簡便法として, 経験式 $V=12.2 TS$ を提案した. 係数の 12.2 は, 結晶法によって体積が算出された 5 つの降下テフラの係数 15.7~8.5 の平均値である. これらは, いずれもブリニー式噴火によるテフラであるが, 三宅島火山の 1983 年噴火によるテフラ (早川ほか 1984) など 10^5 m^3 規模のテフラにも適用できると考えられている (Hayakawa 1985; 早川 1990). これらはマグマ噴火によるテフラであり, 水蒸気噴火は噴出・拡散のメカニズムが異なると考えられるが, $T-S$ 曲線についてはマグマ噴火との差異は認められない (奥野 1995).

一方, 北海道駒ヶ岳の 1996 年噴火 (宇井ほか 1997b) や有珠山の 2000 年噴火 (宝田ほか 2001, 2002) による小規模テフラについて, 両対数表示の重量・面積図上で最小 2 乗法により直線近似できる区間ごとに回帰直線を引き, 各区間の部分積分の総和によって総重量が求められている. (以下, 部分積分法という). この部分積分法を用いて, 信頼度の高い噴出量を見積もるためには, 火口近傍を含む正確な等重量線図を作成する必要がある (宇井ほか 1997b; 宝田ほか 2002).

雌阿寒岳の 1996 年テフラの噴出量は, 鈴木 (1981), Pyle (1985), Hayakawa (1985) の各方法で異なり, Hayakawa (1985) の方法では用いる等重量線により 820 ? 14100 ton と大きくばらつく (宝田ほか 1997). また, 有珠火山の 2000 年 3 月 31 日のテフラでも, Hayakawa (1985) の経験式に用いる等重量線によって 1 桁近くばらついている (宝田ほか 2001, 2002). これらのばらつきは, 積 TS が一定でないことを示す. ただし, 噴火直後に調査された有珠火山の 2000 年噴火であっても, 等重量線はすべて同じ信頼度で制限されていない. 多くの計測地点で制限される 256, 512, 1024 g/m^2 の等重量線を用いて経験式から算出される噴出量は, それぞれ 2.1×10^5 , 2.0×10^5 , 1.7×10^5 ton であり, 部分積分法によって求められた噴出量 2.2×10^5 ton (宝田ほか 2002) とほぼ一致している. このことから, 噴火史を研究するうえで, 小規模なテフラに対しても Hayakawa (1985) の経験式が適用できると考えられる¹⁾. その際には, 最もよく制限された等層厚線を用いることが重要である.

V 水蒸気噴火の年代決定

水蒸気噴火の年代は, テフラ直下の腐植土の ^{14}C 年代によって知ることができる (奥野 1997, 2001; Okuno et al. 1997, 2001). 同一層準の腐植土の ^{14}C 年代はほぼ一致しており, テフラの堆積によって土壌有機物の更新 (分解・付加) および上下移動が停止して, 炭素の閉鎖系が成立・維持されたものと考えられる. したがって, テフラ直下の ^{14}C 年代は, その噴火年代を示しているといえよう.

テフラの正確な暦年代を求めるため, 泥炭層の ^{14}C 年代を用いたウイグル・マッチングも試みられている (例えば, 奥野 2001). この方法は, 類質テフラにも適用できるものと期待される. ただし, 腐植土や泥炭層の ^{14}C 年代を利用する場合, どちらも連続的・整合的に堆積したことが前提となる. 露頭での産状をよく観察して試料を採取する必要がある.

VI 水蒸気噴火の要因と災害

水蒸気噴火は, 十勝岳の 1988-89 年噴火 (Katsui et al. 1990; Miyaji et al. 1990), 普賢岳の 1990-94 年噴火 (Nakada et al. 1999) などのマグマ噴火に先行するものと, 北海道駒ヶ岳の 1996 年, 1998 年, 2000 年噴火, 雌阿寒岳の 1996 年, 1998 年噴火, 秋田焼山の 1997 年噴火などの水蒸気噴火のみで終息するものがある. 水蒸気噴火からマグマ噴火への推移は, マグマの上昇にともなうものであり, 安山岩質の成層火山では一般に認められる現象である (守屋 1992). 九重火山の 1995-96 年噴火では, 類質テフラの変質鉱物の組成や本質物質の含有量の経時変化から, 噴火のプロセスが解明されている (田口ほか 1996; 波多江ほか 1997). 1997 年の澄川温泉や 1972 年の霧島温泉 (露木ほか 1980) などの地熱地域でも, 水蒸気噴火がおこっている. これらは, 地すべり (露木ほか 1980; 塚本 1997) や熱水中の SiO_2 沈殿 (Hedenquist et al. 1985) による熱水経路の閉塞など, 噴気・熱水系の環境変化によるものであり, 熱水性噴火 (hydrothermal eruption) とよばれることもある (Browne and Lawless 2001).

水蒸気噴火によるテフラでは, 火口近傍の弾道岩塊の落下以外, 人的被害はほとんどないと考えられる. ただし, テフラが粘土質である場合, 樹木や建物に付着して破壊することが考えられる. 鶴見火山 (藤沢ほか 2002) や安達太良火山 (山元 1998) などでは, 水蒸気噴火にともなう火山泥流や土石流堆積物が分布し

ており、その災害が想定される。九重火山でも、Kj-Wkの噴火にともなう泥流や土石流堆積物が認められ(Fig. 3a), 1995-96年噴火では小規模な泥流が流下している(中田ほか 1996)。秋田焼山の1997年噴火(林ほか 1997)や有珠火山の2000年噴火(水垣ほか 2001)でも泥流が流出している。Kj-Wkの流路には、法華院温泉などが位置しており、水蒸気噴火にともなう泥流対策を検討する必要がある。

謝辞

本稿は、筆者が金沢大学大学院文学研究科に提出した修士論文とその後の研究をまとめたものである。今春、金沢大学を退官される守屋以智雄教授には、日頃よりご指導いただいている。本稿を守屋教授に献呈し、深く感謝の意を表します。

九重火山の調査では、幸松正浩氏(福岡大)に議論していただいた。宝田晋治博士(産総研・北海道地質調査連携研究体)、田口幸洋教授(福岡大)、林信太郎教授(秋田大)、小林哲夫助教授(鹿児島大)には、草稿に対して有益なコメントをいただき、本稿の内容は大幅に改善された。ただし、いくつかの異論も残っている。この研究の一部に、日本学術振興会科学研究費補助金(奨励研究(A)、代表者:奥野 充、課題番号:11780077;基盤研究(A)(1)、代表者:奥村晃史、課題番号:11308002)および福岡大学研究推進部・研究チーム経費(地球古環境の復元科学研究、代表者:田口幸洋)を使用した。記して感謝の意を表します。

注

- 1) 九重星生山の1995-96年噴火は、マグマが熱源となり、地下に蓄積された気液2相の溜まりの圧力上昇によって、地表付近の岩石が爆発・破壊されたものと考えられる(中田ほか 1996)。本稿では、このような噴火も水蒸気噴火の範疇(中田ほか 1996)として扱う。
- 2) 本稿では、地熱地域の熱水性噴火(hydrothermal eruption: Browne and Lawless 2001)も水蒸気噴火に含める。
- 3) 本稿では、すべて ^{14}C 年代を使用し、その単位は「BP」である。「ka BP」は「1000 BP」に相当する。なお、 ^{14}C 年代の較正暦年代は、「cal BP」で表記される。例えば、K-Ahの ^{14}C 年代は6.5 ka BPで、そ

の較正暦年代は7.3 cal ka BPである。

- 4) 火山泥流や土石流堆積物の詳しい判別は、堆積構造・粒度組成・円磨度などにもとづく。
- 5) 宝田ほか(2001, 2002)は、テフラの体積計算にHayakawa(1985)の経験式を適用することができないと結論づけている。

文 献

- 荒牧重雄 1975. 噴火現象の分類とメカニズム. 火山 20 特別号: 205-221.
- 伊藤順一 1998. 秋田焼山における水蒸気爆発の発生履歴. 日本地質学会第105年学術大会講演要旨: 349.
- 伊藤順一 1999. 西岩手火山において有史時代に発生した水蒸気爆発の噴火過程とその年代. 火山 44: 261-266.
- 伊藤順一・阪口圭一・山元孝広 1997a. 鳴子火山における後カルデラ期の水蒸気爆発. 1997年地球惑星科学関連学会合同大会予稿集: 805.
- 伊藤順一・星住英夫・川辺禎久・鎌田浩毅 1997b. 過去5000年間に九重火山で発生した小規模噴火. 日本火山学会1997年度秋季大会講演予稿集: 106.
- 伊藤順一・川辺禎久・吉田明博・福山佳之・長澤 昭・高橋裕史・佐々木耕造 1997c. 澄川温泉水蒸気爆発堆積物の構成物. 地質ニュース no. 515: 44-48.
- 宇井忠英・吉本充宏・古川竜太・石塚吉浩・吉田真理夫・宮地直道・勝井義雄・紀藤典夫・雁沢好博・野上健治 1997a. 北海道駒ヶ岳1996年3月の噴火. 火山 42: 141-151.
- 宇井忠英・吉本充宏・佐藤十一・橋本 勲・宮村淳一 1997b. 北海道駒ヶ岳1996年3月噴火の噴出量の再検討. 火山 42: 429-431.
- 及川輝樹・奥野 充・中村俊夫 2002. 北アルプス南部、焼岳火山の最近3000年間の噴火史. 地質学雑誌 108: (印刷中).
- 奥野 充 1995. 降下テフラからみた水蒸気噴火の規模・頻度. 金沢大学文学部地理学報告, no. 7: 1-23.
- 奥野 充 1997. 埋没土壌の加速器 ^{14}C 年代から知る噴火年代. 金沢大学文学部地理学報告, no. 8: 17-24.
- 奥野 充 2001. テフロクロノロジーと ^{14}C クロノロジー. 第四紀研究, 40: 461-470.
- 工藤 崇・奥野 充・中村俊夫 1999. 北八甲田火山群における最近5000年間の噴火史. 名古屋大学加速器

- 質量分析計業績報告書 (X) : 218-234.
- 工藤 崇・奥野 充・大場 司・北出優樹・中村俊夫
2000. 北八甲田火山群, 地獄沼起源の噴火堆積物-
噴火様式・規模・年代・火山 45 : 315-322.
- 小林国夫 1967. 黒土の堆積過程にかんする試論. ペド
ロジスト 11 : 15-24.
- 鈴木建夫 1981. 降下火砕堆積物の“層厚・面積”曲線.
火山 26 : 9-23.
- 宝田晋治・広瀬 亘・荒井健一・吉田真理夫・佐々木
寿・児玉 浩・宇井忠英・岡崎紀俊・石丸 聡・渡
辺精久・橋本政樹 1997. 1996 年 11 月雌阿寒岳の噴
火(2) : - 降灰の分布形態, 状況, 降灰量・地球惑星
関連学会 1997 年合同大会予稿集 : 801.
- 宝田晋治・中川光弘・吉本充宏・北川淳一・吉田真理
夫・宇井忠英・岡崎紀俊・広瀬 亘・石丸 聡・佐
藤十一・太田良久 1999. 北海道駒ヶ岳 1998 年 10
月 25 日の小噴火. 1999 年地球惑星科学関連学会合
同大会予稿集 : Vd-P014.
- 宝田晋治・吉本充宏・北川淳一・平賀正人・山元孝広・
川邊禎久・高田 亮・中野 俊・星住英夫・宮城磯
治・西村裕一・三浦大助・廣瀬 亘・石丸 聡・垣
原康之・遠藤祐司・八幡正弘・野呂田 晋・新井田
清信・石塚吉浩・工藤 崇・相沢幸治・本間宏樹・
江草匡倫・石井英一・高橋 良 2001. 有珠火山 2000
年噴火の降灰と火口近傍の状況. 地質調査研究報告
52 : 167-179.
- 宝田晋治・星住英夫・宮城磯治・西村裕一・宮縁育夫・
三浦大助・川邊禎久 2002. 有珠火山 2000 年噴火の
火口近傍堆積物. 火山 47 : (投稿中).
- 田口幸洋・糸井龍一・甲斐辰次・渡辺公一郎・江原幸
雄・筒井智樹 1996. 噴出物から見た 1995 年九重硫
黄山の噴火過程. 文部省科学研究費突発災害調査
「1995 年 10 月九重火山の水蒸気爆発の発生機構と
火山活動推移の調査・研究」(代表者: 小林芳正) 研
究成果報告書, : 75-82.
- 塚本 斎 1997. 秋田県澄川温泉における地すべりと水
蒸気爆発に伴う土砂災害の発生プロセス. 地質ニュー
ース no. 515 : 53-67.
- 露木利貞・金田良則・小林哲夫 1980. 火山地域にみら
れる地盤災害とその評価 (1) 霧島火山群地域にみ
られる崩壊型について. 鹿児島大学理学部紀要 (地
学・生物学) no. 13 : 91-103.
- 中川光弘・宝田晋治・吉田真理夫・宇井忠英・広瀬 亘・
岡崎紀俊・石丸 聡・札幌管区気象台・佐藤十一・
釧路地方気象台・佐藤多佳夫 1999. 雌阿寒岳 1998
年 11 月 9 日の小噴火. 1999 年地球惑星科学関連学
会合同大会予稿集 : Vd-013.
- 中川光弘・野上健治・石塚吉浩・吉本充宏・高橋良・
石井英一・江草匡倫・宮村 淳一・志賀 透・岡崎紀
俊・石丸 聡 2001. 北海道駒ヶ岳 2000 年噴火: そ
の推移と意味. 2001 年地球惑星科学関連学会合同大
会予稿集 : Jp-019.
- 中田節也・渡辺一徳・渡辺公一郎・本村慶信・檀原 徹
1996. 九重火山, 1995 年 10 月- 1996 年 1 月噴火:
地質と岩石. 文部省科学研究費突発災害調査「1995
年 10 月九重火山の水蒸気爆発の発生機構と火山活
動推移の調査・研究」(代表者: 小林芳正) 研究成果
報告書, : 33-39.
- 中村一明・荒牧重雄・村井 勇 1963. 火山の噴火と堆
積物の性質. 第四紀研究 3 : 13-30.
- 波多江憲治・渡辺公一郎・渡辺一徳・筒井智樹・本村
慶信 1997. 九重火山 1995-96 年噴火活動に伴う火山
灰中の発泡ガラス含有量の経時変化. 火山 42 :
345-353.
- 早川由紀夫 1990. 堆積物から知る過去の火山噴火. 火
山 34 : S121-S130.
- 早川由紀夫 1991. テフラとレスからみた火山の噴火と
噴火史. 第四紀研究 30 : 391-398.
- 早川由紀夫 1995. 日本に広く分布するローム層の特徴
とその成因. 火山 40 : 177-190.
- 早川由紀夫・荒牧重雄・白尾元理・小林哲夫・徳田安
伸・津久井雅志・加藤 隆・高田 亮・小屋口剛博・
小山真人・藤井敏嗣・大島 治・曾屋龍典・宇都浩
三 1984. 1983 年 10 月 3・4 日三宅島火山噴出の降下
火砕堆積物. 火山 29 : S208-S220.
- 林 信太郎・伊藤英之・千葉達朗 1997. 1997 年 8 月
16 日秋田焼山火山の水蒸気爆発 (速報). 地質学雑
誌 103 : XXVII-XXVIII.
- 藤沢康弘・奥野 充・中村俊夫・小林哲夫 2002. 九州
北東部, 鶴見火山の最近 3 万年間の噴火活動. 地質
学雑誌 108 : (印刷中).
- 水垣 滋・三島啓雄・菊池俊一・新谷 融 2001. 有珠
山 2000 年噴火による流域荒廃と泥流. 新砂防 54 :
47-53.

- 三宅康幸・小坂丈予 1998. 長野県安曇村中ノ湯における 1995 年 2 月 11 日の水蒸気爆発. 火山 43:113-121.
- 宮縁育夫・渡辺一徳 2000. 阿蘇火山地獄温泉付近における水蒸気爆発とその堆積物. 火山 45:25-32.
- 守屋以智雄 1992. 噴火の長期予測とその災害. 金沢大学文学部地理学報告, no. 6:1-12.
- 山元孝広 1997a. 安達太良火山の最新期噴火活動. 1997 年地球惑星科学関連学会合同大会予稿集:802.
- 山元孝広 1997b. テフラ層序からみた那須茶臼岳火山の噴火史. 地質学雑誌 103:676-691.
- 山元孝広 1998. 安達太良火山西山麓の完新世酸川ラール堆積物. 火山 43:61-68.
- 山元孝広・須藤 茂 1996. テフラ層序からみた磐梯火山の噴火活動史. 地質調査所月報 47:335-359.
- 渡辺一徳・星住英夫・池辺伸一郎 1992. 雲仙普賢岳 1990 年 11 月～1991 年 5 月の噴火活動-噴火開始から溶岩出現まで-. 熊本大学教育学部紀要 (自然科学) 41:47-60.
- Barberi, F., Bertagnini, A., Landi, P. and Principe, C. 1992. A review on phreatic eruptions and their precursors. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 52: 231-246.
- Browne, P. R. L. and Lawless, J. V. 2001. Characteristics of hydrothermal eruptions, with examples from New Zealand and elsewhere. *Earth-Science Reviews* 52: 299-331.
- Hayakawa, Y. 1985. Pyroclastic geology of Towada volcano. *Bulletin of Earthquake Research Institute* 60: 507-592.
- Hedenquist, J. W. and Henley, R. W. 1985. Hydrothermal eruptions in the Waiotapu geothermal system, New Zealand: their origin, associated breccias, and relation to precious metal mineralization. *Economic Geology* 80: 1640-1668.
- Kamata, H. and Kobayashi, T. 1997. The eruptive rate and history of Kuju volcano in Japan during the past 15,000 years. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 76: 163-171.
- Katsui, Y., Kawachi, S., Kondo, Y., Ikeda, Y., Nakagawa, M., Gotoh, Y., Yamagishi, H., Yamazaki, T. and Sumita, M. 1990. The 1988-1989 explosive eruption of Tokachi-dake, Central Hokkaido, its sequence and mode. *Bulletin of the Volcanological Society of Japan* 35: 111-129.
- Miyaji, M., Sumita, M., Yoshida M., Kondo, Y., Yamazaki, T., Kouyama, K., Sone, T. and Muto, H. 1990. Tephra-stratigraphical study of the 1988-1989 eruptions of Tokachi-dake volcano, Central Hokkaido. *Bulletin of the Volcanological Society of Japan* 35: 131-145.
- Nakada, S., Shimizu, H. and Ohta, K. 1999. Overview of 1990-1995 eruptions at Unzen Volcano. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 89: 1-22.
- Okuno, M., Nakamura, T., Moriwaki, H. and Kobayashi, T. 1997. AMS radiocarbon dating of the Sakurajima tephra group, southern Kyushu, Japan. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 123: 470-474.
- Okuno, M., Nakamura, T., Kamata, H. and Kobayashi, T. 2001. Radiocarbon dating of paleosol intercalated with tephra layers in Japan. In *TEPHRAS, chronology/chronologie, archeology/archeologie*, ed. E. Juvigné and J.P. Raynal, 67-71. Clermont-Ferrand: Centre Regional de Documentation Pédagogique d'Auvergne.
- Pyle, D. M. 1989. The thickness, volume and grain size of tephra fall deposits. *Bulletin of Volcanology* 51: 1-15.
- Walker, G.P.L. 1980. The Taupo pumice: product of the most powerful known (ultraplinian) eruption? *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 8: 69-94.

- 三宅康幸・小坂文予 1998. 長野県安曇村中ノ湯における1995年2月11日の水蒸気爆発. 火山 43:113-121.
- 宮縁育夫・渡辺一徳 2000. 阿蘇火山地獄温泉付近における水蒸気爆発とその堆積物. 火山 45:25-32.
- 守屋以智雄 1992. 噴火の長期予測とその災害. 金沢大学文学部地理学報告, no. 6:1-12.
- 山元孝広 1997a. 安達太良火山の最新期噴火活動. 1997年地球惑星科学関連学会合同大会予稿集:802.
- 山元孝広 1997b. テフラ層序からみた那須茶臼岳火山の噴火史. 地質学雑誌 103:676-691.
- 山元孝広 1998. 安達太良火山西山麓の完新世酸川ラハール堆積物. 火山 43:61-68.
- 山元孝広・須藤 茂 1996. テフラ層序からみた磐梯火山の噴火活動史. 地質調査所月報 47:335-359.
- 渡辺一徳・星住英夫・池田伸一郎 1992. 雲仙普賢岳1990年11月～1991年5月の噴火活動-噴火開始から溶岩出現まで-. 熊本大学教育学部紀要(自然科学) the past 15,000 years. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 76:163-171.
- Katsui, Y., Kawachi, S., Kondo, Y., Ikeda, Y., Nakagawa, M., Gotoh, Y., Yamagishi, H., Yamazaki, T. and Sumita, M. 1990. The 1988-1989 explosive eruption of Tokachi-dake, Central Hokkaido, its sequence and mode. *Bulletin of the Volcanological Society of Japan* 35:111-129.
- Miyaji, M., Sumita, M., Yoshida M., Kondo, Y., Yamazaki, T., Kouyama, K., Sone, T. and Muto, H. 1990. Tephra-stratigraphical study of the 1988-1989 eruptions of Tokachi-dake volcano, Central Hokkaido. *Bulletin of the Volcanological Society of Japan* 35:131-145.
- Nakada, S., Shimizu, H. and Ohta, K. 1999. Overview of 1990-1995 eruptions at Unzen Volcano. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 89:1-22.
- Okuno, M., Nakamura, T., Moriwaki, H. and Kobayashi, T. 1997. AMS radiocarbon dating of the Sakurajima tephra group, southern Kyushu, Japan. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*123:470-474.
- Okuno, M., Nakamura, T., Kamata, H. and Kobayashi, T. 2001. Radiocarbon dating of paleosol intercalated with tephra layers in Japan. In *TEPHRAS, chronology/chronologie, archeology/archeologie*, ed. E. Juvigné and J.P. Raynal, 67-71. Clermont-Ferrand: Centre Regional de Documentation Pédagogique d'Auvergne.
- 41:47-60.
- Barberi, F., Bertagnini, A., Landi, P. and Principe, C. 1992. A review on phreatic eruptions and their precursors. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 52:231-246.
- Browne, P. R. L. and Lawless, J. V. 2001. Characteristics of hydrothermal eruptions, with examples from New Zealand and elsewhere. *Earth-Science Reviews* 52:299-331.
- Hayakawa, Y. 1985. Pyroclastic geology of Towada volcano. *Bulletin of Earthquake Research Institute* 60:507-592.
- Hedenquist, J. W. and Henley, R. W. 1985. Hydrothermal eruptions in the Waiotapu geothermal system, New Zealand: their origin, associated breccias, and relation to precious metal mineralization. *Economic Geology* 80:1640-1668.
- Kamata, H. and Kobayashi, T. 1997. The eruptive rate and history of Kuju volcano in Japan during
- Pyle, D. M. 1989. The thickness, volume and grainsize of tephra fall deposits. *Bulletin of Volcanology* 51:1-15.
- Walker, G.P.L. 1980. The Taupo pumice: product of the most powerful known (ultraplinian) eruption? *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 8:69-94.